第46卷 第3期
2023年3月

干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

Vol. 46 No. 3
Mar. 2023

疏勒河流域生态系统服务供需空间匹配特征

周 凡[1]， 周冬梅[2]， 金银丽[2]， 马 静[2]， 杨 静[2]， 朱小燕[2]， 张 军[2,3,4]

（1. 甘肃农业大学管理学院，甘肃 兰州 730070；2. 甘肃农业大学资源与环境学院，甘肃 兰州 730070；
3. 甘肃省节水农业工程技术研究中心，甘肃 兰州 730070；4. 干旱生境作物学国家重点实验室，
甘肃 兰州 730070）

摘 要：生态系统服务与人类可持续发展紧密相连，研究区域生态系统服务供需特征，了解其空间匹配状况是实现生态资源有效配置和推动区域生态安全的重要前提。基于多源数据，在InVEST模型、ArcGIS和GeoDA软件的支撑下，分析疏勒河流域产水服务、固碳服务、食物服务供需特征和空间匹配状况。结果表明：(1) 除产水服务外，疏勒河流域其他各项生态系统服务供给均大于需求，但不同区域和生态系统服务间存在差异。(2) 疏勒河流域综合服务供需比为0.063，不同生态系统服务的供需比由高到低依此为：固碳服务（0.1854）、食物服务（0.0078）和产水服务（-0.0043）。(3) 产水服务和固碳服务空间匹配类型都主要以低高型空间错位和高低型空间错位为主，食物服务空间匹配类型主要以低低型空间匹配为主，其中产水服务的空间匹配错位现象最严重。

关 键 词：生态系统服务；供需关系；空间匹配；疏勒河流域

文章编号：1000－6060(2023)03－0471－10(0471～0480)

经济过快的发展加重了生态环境的压力，土地退化、干旱、荒漠化和生物多样性丧失等问题接踵而至[1]，威胁到人类的生存环境，而生态系统服务功能是维系人类生存和支撑地球生命系统的物质基础，人类生存与发展所需要的资源归根结底都来源于自然生态系统。中国政府先后出台了《全国重要生态系统保护和修复重大工程总体规划（2021—2035年）》《山水林田湖草生态保护修复工程指南（试行）》《关于深化生态保护补偿制度改革的意见》等政策指引，以保障国家生态建设，以及完善生态系统功能，进而加快生态文明体制改革，建设美丽中国。因此，深入挖掘生态系统服务的供需关系，揭示其供需空间分布状态就显得尤为重要。

生态系统服务的供给与需求共同构成生态系统服务从自然生态系统流向人类社会系统的动态过程[2-3]，近些年来关于生态系统服务供需的研究主要集中在生态系统服务供给与需求的量化、不同时空尺度下供需匹配关系和供需关系的演变过程[4-6]、生态系统服务流[7-8]等方面，且大多研究都以生态系统服务价值当量、土地利用估计、专家评估矩阵等方法为主[9-13]。研究尺度也主要集中在流域、市域、全球尺度等中大尺度，小尺度的相对较少。国外学者对生态系统服务供需的研究较多，如Costanza等[14]首次对全球生态系统服务价值进行了评估；Wolff等[15]以全球为研究尺度研究人类对昆虫授粉、野生药用植物和室外游玩的需求空间图；Ala-Hulkko等[16]量化了粮食的供给与需求，绘制了欧洲生态系统服务供需关系图；Schirpke等[17]对欧洲阿尔卑斯山地区多重生态系统服务供给、流与需求簇间关系进行了研究。我国对于生态系统服务供需的研究起步较晚，主要集中在对生态系统服务供需的理论研究[18-20]，也有部分学者对生态系统服务供需的时空变化做了研究，如刘立程等[21]选取多种生态系统服务指标来研究黄土丘陵区的供需匹配情况；李成等采用Burkhard

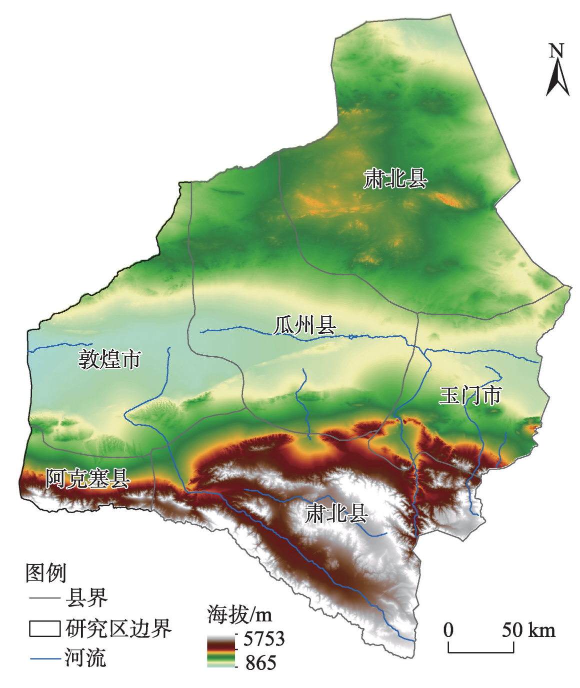
收稿日期：2022-07-06； **修订日期：**2022-08-02
基金项目：甘肃省高等学校创新基金(2021A-061)；甘肃省自然科学基金(21JR7RA811)；甘肃省林业和草原科技创新计划(LCKJCX202-205)资助
作者简介：周凡(1996-)，女，硕士研究生，主要从事生态系统服务方面的研究. E-mail: 1993680289@qq.com
通讯作者：张军(1977-)，男，博士，教授，主要从事农业生态学和土地资源管理等方面的研究. E-mail: zhangjun@gsau.edu.cn

等[22]提出的生态系统服务供需评价矩阵法分析供需格局;赵雪雁[23]也通过4项生态系统服务指标来反映生态系统服务供需的时空变化;胡其玉等[24]通过耦合生态系统服务供需和景观生态安全格局,探究城市群地区生态空间结构,从而达到优化农业-城镇-生态网络空间布局的目的。

疏勒河流域是河西地区三大内陆河流域之一,其又位于"两屏三带"中的北方防沙带,是重要的生态屏障之一[25],流域内降水稀少且分布极不均匀,生态环境脆弱,是甘肃省干旱程度最严重的地区之一[26]。这严重制约着该区生态可持续发展,而研究生态系统服务供需对实现生态安全具有重要的参考意义,且目前没有关于疏勒河流域生态系统服务供需方面的研究,因此有必要厘清该区域生态系统服务供需格局,为资源科学有效的分配提供依据。综上所述,本文以疏勒河流域为研究区,选择产水、固碳、食物3项生态系统服务,分析各项生态系统服务供需的空间供需特征和匹配状况,为疏勒河流域生态系统优化提供理论支持。

1 研究区概况

疏勒河流域(93°22′~98°59′E,38°10′~42°47′N)位于甘肃省河西走廊西端,面积约1.12×10^5 km^2[27],地势北低南高,海拔802~5504 m(图1)。流域内降水量少,蒸发量大,是以高山冰雪融水和山区降水为补给的内陆河流,流域上游山区山高坡陡,水流急促,具有典型的大陆性永久性冰川,同时也发育大面积多年冻土,是整个流域的产流区和水源涵养区。中、下游地势平坦,绿洲与荒漠并存,自然环境十分脆弱。疏勒河流域范围包括肃北蒙古族自治县、瓜州县、玉门市、敦煌市部分区域和阿克塞哈萨克族自治县(简称阿克塞县)部分区域。其中,肃北蒙古族自治县包括肃北蒙古族自治县北部[简称肃北县(北)]、肃北蒙古族自治县南部[简称肃北县(南)]两部分。



注:肃北县表示肃北蒙古族自治县;阿克塞县表示阿克塞哈萨克族自治县。下同。

图1 研究区示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the study area

2 数据与方法

2.1 数据来源

研究数据来源为:(1) 2020年土地利用数据来源于Globeland30全球地理信息公共产品;(2) 2020年归一化植被指数(NDVI)数据来源于国家青藏高原科学数据中心(http://data.tpdc.ac.cn/zh-hans/),剔除11、12月和1月,求其余9个月份NDVI的均值;(3) 2020年研究区各县区人口数据、食物产量数据、能源消耗数据和水资源消耗数据来源于甘肃省和研究区各县区统计年鉴;(4) 2020年人口栅格数据来源于WorldPop(https://www.worldpop.org);(5) 2020年栅格国内生产总值(GDP)密度数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心(https://www.resdc.cn);(6) 人均用水量来源于2021年酒泉市国民经济和社会发展统计公报;(7) 每万元GDP耗水量和耕地平均灌溉用水量来源于2020年甘肃省水资源公报。

2.2 研究方法

2.2.1 产水服务 产水服务是生态系统拦截滞蓄降水、储存淡水的一项重要服务,可以有效保持土壤水分,调节河流流量[28]。本文采用InVEST模型中的产水模块(Water yield)计算疏勒河流域产水服务供给量;结合研究区人口栅格密度、人均用水量、栅格GDP密度等数据计算产水服务的需求量,计算公式[29-31]如下:

$$\text{供给}: S_{wp} = \left(1 - \frac{AET_{(x)}}{P_{(x)}}\right) \times P_{(x)} \tag{1}$$

$$\frac{AET_{(x)}}{P_{(x)}} = 1 + \frac{PET_{(x)}}{P_{(x)}} - \left\{1 + \left(\frac{PET_{(x)}}{P_{(x)}}\right)^{w}\right\}^{1/w} \quad (2)$$

$$PET_{(x)} = K_{C(x)} \times ET_{O(x)} \quad (3)$$

$$W_{(x)} = \frac{AWC_{(x)} \times Z}{P_{(x)}} + 1.25 \quad (4)$$

$$需求：D_{wp} = P_{pop} \times x + G_{gdp} \times y + A_c \times Y \quad (5)$$

式中：S_{wp} 为2020年产水服务供给量(mm)；$AET_{(x)}$ 为栅格单元的年实际蒸散量(mm)；$P_{(x)}$ 为栅格单元的年降水量(mm)；$PET_{(x)}$ 为栅格单元x的潜在蒸散量(mm)；$K_{C(x)}$ 为作物蒸散发系数；$ET_{O(x)}$ 为参考(作物)蒸散量(mm)；$AWC_{(x)}$ 为植物可利用含水量(mm)；$W_{(x)}$ 为经验参数；Z 为Zhang系数[28]；D_{wp} 为需水量(m^3)；P_{pop} 为栅格人口密度(人·km^{-2})；x为人均用水量(m^3)，包括生活用水、农业用水、工业用水和生态用水；G_{gdp} 为栅格GDP密度数据(10^4元·km^{-2})；y为每万元GDP耗水量(m^3)；A_c 为耕地栅格空间分布数据，提取自土地覆被数据；Y 为耕地平均灌溉用水量($m^3 \cdot km^{-2}$)

2.2.2 食物服务 食物服务是农业生态系统中一项重要的服务功能，而农作物与归一化植被指数(NDVI)之间具有显著的线性关系[32]，因此参考刘立程等[21]的研究，计算公式如下：

$$供给：G_i = G_{sum} \times \frac{NDVI_i}{NDVI_{sum}} \quad (6)$$

$$需求：D_{fp} = D_{pcfc} \times \rho_{pop} \quad (7)$$

式中：G_i为i栅格分配的粮食、肉类、奶类的产量(t·km^{-2})；G_{sum}为研究区粮食总产量、肉类、奶类总产量(t)；$NDVI_i$为i栅格的归一化植被指数；$NDVI_{sum}$为耕地或草地的NDVI值之和；D_{fp}为食物需求量(t)；D_{pcfc}为人均食物需求量(t)；ρ_{pop}为栅格人口密度(人·km^{-2})。

2.2.3 固碳服务 固碳服务能够捕获并固定大气中的CO_2，有效调节气候[33-34]，是生态系统中一项重要的调节服务。本文参考刘立程等[21]的研究，用InVEST模型中的Carbon Storage模块评估疏勒河流域固碳服务供给量，以研究区人均碳排放量与人口密度的乘积作为固碳服务的需求量。计算公式[21,23]如下：

$$供给：C_{tot} = C_{above} + C_{below} + C_{soil} + C_{dead} \quad (8)$$

$$需求：D_{cp} = D_{pccc} \times \rho_{pop} \quad (9)$$

式中：C_{tot}为总碳储量(t·hm^{-2})；C_{above}为地上生物碳(t·hm^{-2})；C_{below}为地下生物碳(t·hm^{-2})；C_{soil}为土壤有机碳(t·hm^{-2})；C_{dead}为死亡有机物(t·hm^{-2})；D_{cp}为固碳需求量(t)；D_{pccc}为人均碳排放量(t)；ρ_{pop}为栅格人口密度(人·km^{-2})。

2.3 生态系统服务供需比

生态系统服务供需比(ESDR)可以用来反映生态系统服务供需情况，计算公式[35]如下：

$$ESDR = \frac{S - D}{(S_{max} + D_{max}) \div 2} \quad (10)$$

式中：ESDR为生态系统服务供需比；S为生态系统服务的供给量；D为生态系统服务的需求量；S_{max}为供给量的最大值；D_{max}为需求量的最大值。ESDR>0表示生态系统服务供大于求；ESDR<0表示供小于求；ESDR=0则表示供需平衡。

生态系统服务综合供需比(CESDR)用于反映流域生态系统服务供需匹配的总体情况，计算公式[21]如下：

$$CESDR = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} ESDR_i \quad (11)$$

式中：CESDR为生态系统服务综合供需比；n为生态系统服务类型总数，本文中的生态系统服务类型总数为3；$ESDR_i$为i类生态系统服务的供需比。

2.4 生态系统服务供需空间匹配

利用GeoDA中的双变量局部自相关指数(LISA)来分析各项生态系统服务供需的空间匹配状况，计算公式[21]如下：

$$LISA_i = \frac{1}{n}\frac{(x_i - \bar{x})}{\sum_i (x_i - \bar{x})^2}\sum_j w_{ij}(x_i - \bar{x}) \quad (12)$$

式中：$LISA_i$ 为i类双变量局部自相关指数；w_{ij}为单元i与单元j之间的空间权重矩阵；x_i为单元i的属性值；$\bar{x}$ 为所有属性值的平均值；n为区域单元的总数。LISA>0，表示空间单元的服务平衡度是高-高值或低-低值的空间聚集；LISA<0，表示空间单元的服务平衡度为高-低值或低-高值的空间聚集。

3 结果与分析

3.1 生态系统服务供需分布格局

总体来看，疏勒河流域2项生态系统服务的总供给量大于总需求量，但不同生态系统服务间与不

同县区又有所不同(图2、表1),主要是降水分配不均所导致。除产水服务总供给量小于总需求量之外,固碳服务和食物服务均是总供给量大于总需求量。其中,产水服务总供给量为23.74×10^8 m^3,单位面积产水量为206.600 m^3·hm^-2,单位面积产水量高值区主要为肃北县(南),该区域位于流域西南部,为盐池湾自然保护区所在地,该地海拔较高,有冰川积雪,年降水量相对较多且蒸发量较小,是河流发源地;产水服务总需求量为28.23×10^8 m^3,单位面积需水量为245.764 m^3·hm^-2,单位面积需水量高值区主要集中在流域中、下游耕地分布区和敦煌市、瓜州县、玉门市等地,这些区域水热条件良好、农业需水量大、人口密度较大且相较于流域其他地区工业比较发达,对水资源的需求量大。

食物服务总供给量为9.33×10^7 t,单位面积食物供给量为8.089 t·km^-2,单位面积食物供给量高值区主要集中在流域中、下游耕地资源较为丰富的玉门市和瓜州县,而肃北县(北)和阿克塞县主要以裸地

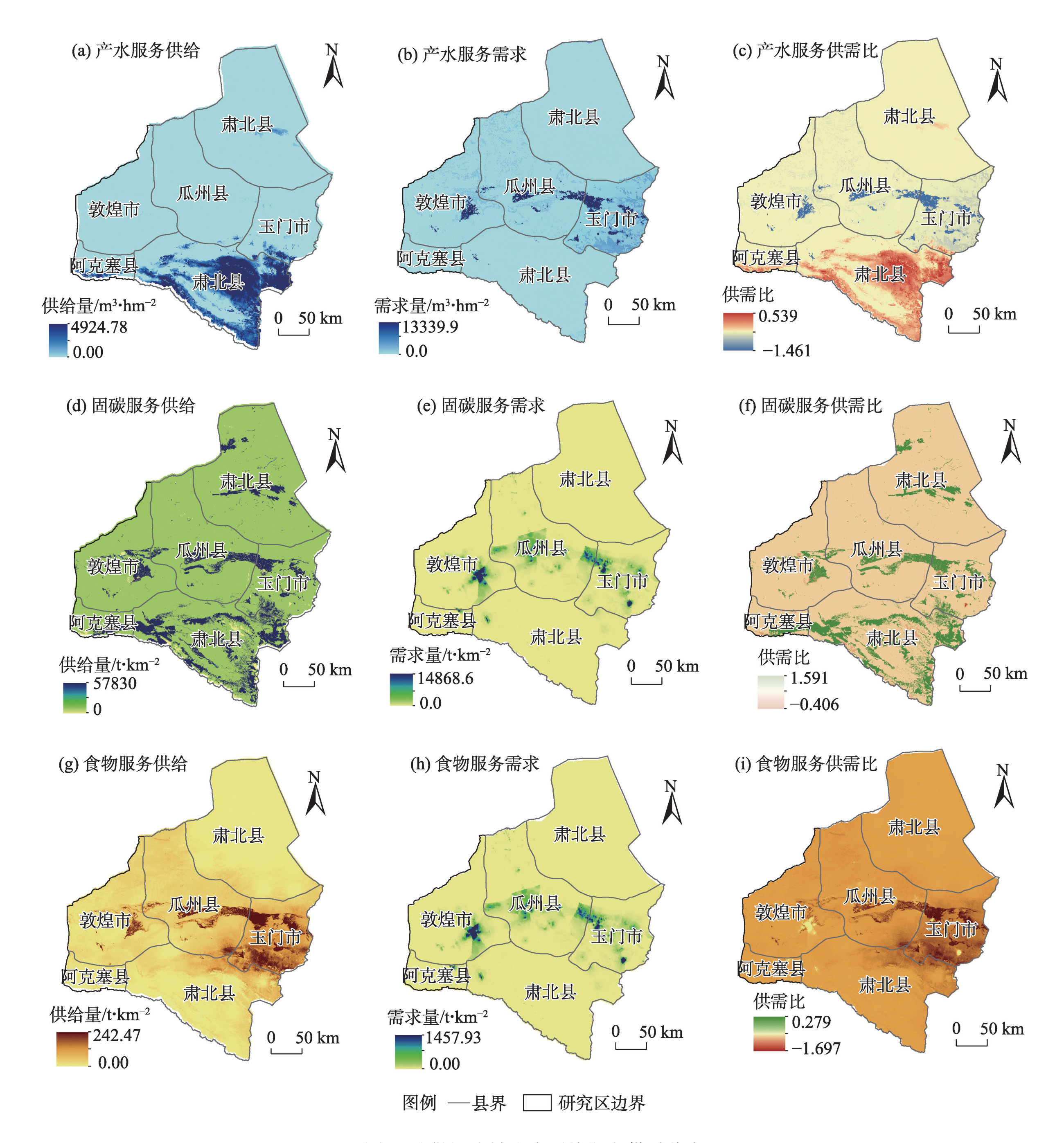


图2 疏勒河流域生态系统服务供需分布

Fig. 2 Spatial distributions of supply and demand of ecosystem services in the Shule River Basin

为主，自然条件差，食物产量较低；食物服务总需求量为1.65×10^7 t，单位面积食物需求量为1.435 t·km^{-2}，单位面积食物需求量高值区主要分布在人口密度较大的玉门市和敦煌市的中心城区，单位面积食物需求量低值区主要分布在人口少的肃北县（北）、肃北县（南）以及阿克塞县等地。

固碳服务总供给量为5.96×10^8 t，单位面积固碳供给量为5175.905 t·km^{-2}，单位面积固碳供给量高值区主要集中于耕地、林地植被覆盖度高的区域，受区域生态系统类型分布的影响，疏勒河流域中、下游河流两岸绿洲地区、肃北县（南）的大部分区域以及肃北县（北）的马鬃山区域为单位面积固碳供给量高值区；固碳服务总需求量为1.68×10^6 t，单位面积固碳需求量为14.633 t·km^{-2}，单位面积固碳需求量高值区主要集中在敦煌市、玉门市和瓜州县的中心城区，这些区域人口密度较大，对碳需求量较大。

3.2 生态系统服务供需数量匹配分析

疏勒河流域产水服务、食物服务、固碳服务的供需比分别为−0.0043、0.0078和0.1854，综合供需比为0.0630（表2），3项服务的综合供需比均大于0，表明疏勒河流域整体生态系统服务供需的水平较高，总体上说明疏勒河流域供给较为充足，但区域内存在显著差异。肃北县（南）的3项生态系统服务供需比在各县区中都较高，其次为肃北县（北），说明这2地的生态系统服务供需匹配最好，供给充足。

除产水服务外，疏勒河流域其他2项生态系统服务较为充足，但生态系统服务内部差异还是较为显著。就各项不同生态系统服务来看，产水服务的供需矛盾最大，流域总体的产水服务供需比也小于0。由于研究区属于大陆性干旱气候，降水少但蒸发量大，所以水源涵养较好的区域就主要集中在海拔高、降水较充足的南部，即除了阿克塞县和肃北县（南）之外，流域内其他地方产水服务供需比均小于0，意味着这些区域产水服务供需矛盾相对严重，存在供不应求的局面。

3.3 生态系统服务供需空间匹配分析

利用GeoDA对各项生态系统服务供需进行双变量局部自相关分析可知，疏勒河流域共有4种生态系统服务供需空间匹配类型（图3）：高高型空间匹配（高需求高供给）、低低型空间匹配（低需求低供给）、低高型空间错位（低需求高供给）、高低型空

表1 疏勒河流域各县区生态系统服务平均供需量

Tab. 1 Supply and demand of ecosystem services in Shule River Basin

区域	产水服务/m^3·hm^{-2}		固碳服务/t·km^{-2}		食物服务/t·km^{-2}	
	供给量	需求量	供给量	需求量	供给量	需求量
流域	206.600	245.764	5175.905	14.633	8.089	1.435
肃北县（北）	5.240	9.020	3963.995	0.043	1.687	0.004
瓜州县	2.560	402.170	4372.639	20.846	10.320	2.044
敦煌市	0.110	271.410	4218.987	33.734	5.724	3.308
玉门市	52.410	992.471	5476.027	39.515	29.299	3.875
阿克塞县	178.090	25.550	5507.858	6.249	2.623	0.613
肃北县（南）	875.420	26.400	7882.977	1.672	5.621	0.164

注：肃北县表示肃北蒙古族自治县；阿克塞县表示阿克塞哈萨克族自治县。下同。

表2 疏勒河流域各县区生态系统服务供需比

Tab. 2 Ecological service supply and demand ratio in each district and county of Shule River Basin

区域	产水服务供需比	固碳服务供需比	食物服务供需比	综合供需比
流域	−0.0043	0.1854	0.0078	0.0630
肃北县（北）	−0.0004	0.1424	0.0020	0.0480
瓜州县	−0.0438	0.1563	0.0097	0.0408
敦煌市	−0.0297	0.1503	0.0028	0.0411
玉门市	−0.1029	0.1952	0.0299	0.0407
阿克塞县	0.0167	0.1976	0.0024	0.0722
肃北县（南）	0.0930	0.2830	0.0064	0.1275

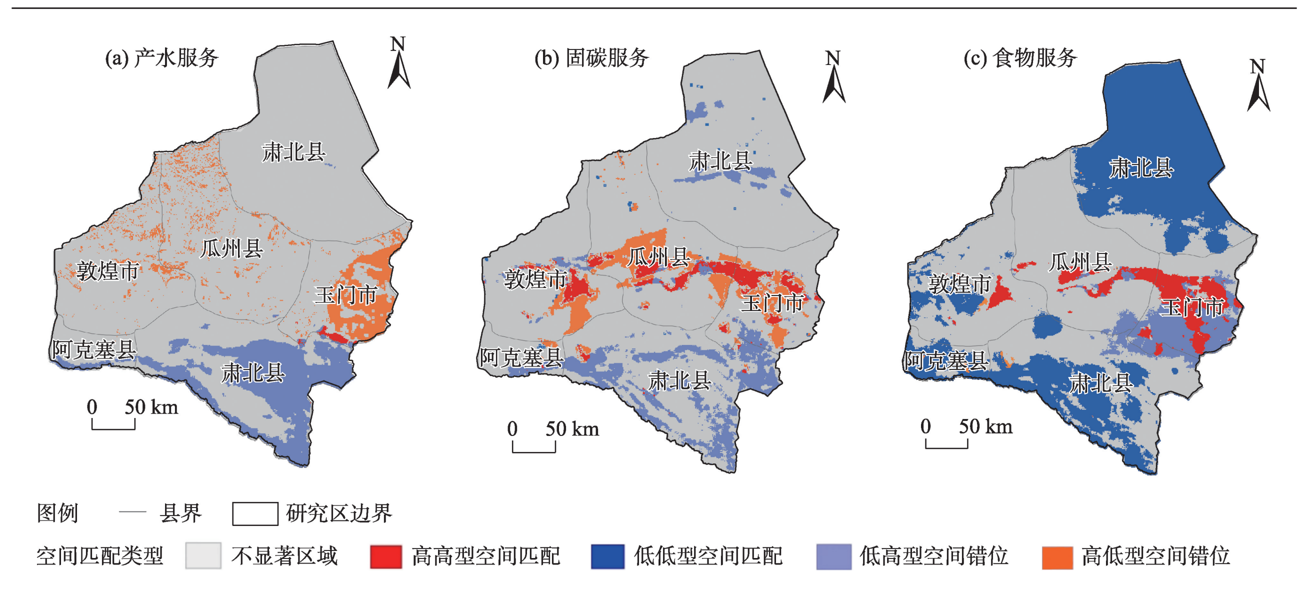


图3 疏勒河流域生态系统服务供需空间匹配

Fig. 3 Spatial matching of supply and demand of ecosystem services in the Shule River Basin

间错位(高需求低供给)。除去不显著区域,疏勒河流域产水服务的供需空间格局主要以低高型空间错位和高低型空间错位的空间匹配类型为主,面积占比分别为11.77%和7.27%(图4)。其中,低高型空间错位的区域主要集中在肃北县(南),由于该区域海拔高,有冰川积雪,降水量相对多,水源涵养量较高,而该区域人口很少,农业也不发达,所以整体来说需水量不大,因此属于低高型空间错位;高低型空间错位区域主要集中在玉门市的东部以及零星分布在瓜州县和敦煌市,主要由于这些区域属于研究区发展较好的县区,需水量较大,但由于受到气候影响,降水少蒸发量大导致出现了高低型空间错位的局面。

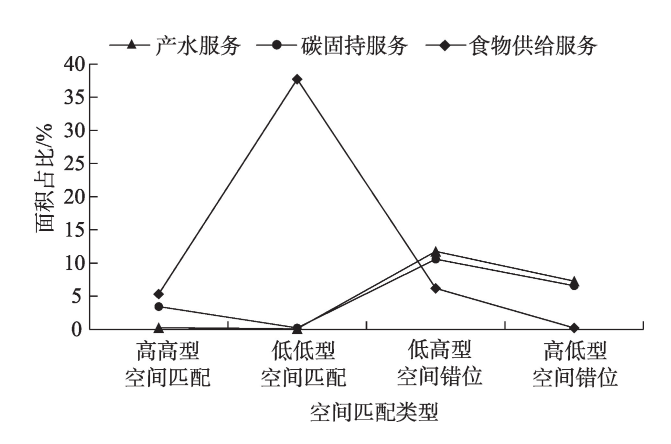


图4 疏勒河流域各项生态系统服务不同空间匹配类型面积占比

Fig. 4 Area ratio of different types of spatial matching of various ecosystem services in the Shule River Basin

疏勒河流域固碳服务的供需空间格局主要以低高型空间错位和高低型空间错位为主,面积占比分别为10.59%和6.58%(图4)。其中低高型空间错位区域零星分布于肃北县(北)、肃北县(南)和阿克塞县的小部分区域,其土地利用以草地和林地为主且草地面积较大,固碳能力强,因此属于低高型空间错位;高低型空间错位区域主要集中在疏勒河流域中、下游两岸人口密度较大的城区,由于这些区域人口密集且从事工业生产活动,固碳能力弱、碳排放量高,属于高低型空间错位。

食物服务的供需空间格局主要以低低型空间匹配为主,其次低高型空间错位和高高型空间匹配也均有分布,面积占比分别为37.73%、6.20%和5.32%(图4)。其中,低低型空间匹配区域主要集中在肃北县(北)以及肃北县(南)和阿克塞县部分区域,由于这些区域人口稀少,且主要地类以裸地为主,粮食等食物供给少,所以形成了低低型空间匹配的局面;高高型空间匹配的区域主要与人口密度分布高度吻合,这些区域人口密集,对食物需求量较大,同时该区域地类主要为耕地,产粮量大,因此该区域属于高高型空间匹配。

4 讨论

疏勒河流域属于典型的大陆性干旱气候,降水极少,蒸发量大,主要地类以裸地为主,人口稀少。本文从供需视角分析了疏勒河流域产水、固碳和食

物3项生态系统服务供需特征和空间匹配状况。研究发现，除产水服务外，其他2项生态系统服务供需量均是供大于求，且产水服务空间错位现象最严重，这主要与其南高北低的地势和降水分布不均有关，这也与以往研究结论基本一致[36-37]。与水热条件良好、经济发达的平原地区不同[38-40]，由于自然条件和经济社会条件的制约，疏勒河流域的生态系统服务供需处于明显落后的状态，但整体供需平衡，除产水服务外，其余生态系服务均是供大于求；且由于疏勒河流域地势起伏大、裸地居多、植被稀少，疏勒河流域各项生态系统服务供需都受其影响，出现大片区域供需都是0的现象。

研究区中部为农业聚集区，也是人口密集区，该区域生态系统服务供需空间匹配基本处于高低型空间错位的状态，所以针对这些区域要强化农田生态保护、修护退化耕地、平整耕地以提高质量，提高灌溉技术，引进节水项目农田改造。除了食物服务之外，研究区北部和南部是其他2项服务的高供给区域，这些区域地广人稀，要加大力度保护这些生态脆弱区，适当植树造林，严禁人类对生态不合理的干扰活动。

生态系统服务和人类可持续发展是前因后果的关系，生态系统服务供给和需求是生态系统服务从自然生态系统流向人类社会系统复杂、动态的过程[18]。目前，生态系统服务供需的研究方法大都以评价矩阵和价值当量为主，本文选取了3项生态系统服务，量化了其供给和需求，明晰了其在空间中的供需格局。本文在研究过程中只选取了单一的年份，没有从时间序列说明其生态系统服务供需的变化；其次目前的大多数研究也只是停留在供需时空特征上，如何明晰生态系统服务供给到需求的空间动态流动过程问题还有待进一步研究。因此，未来的研究需从长时间序列分析生态系统服务供需的年际变化，区分潜在供给、实际供给、潜在需求和实际需求间的平衡关系，进一步探索生态系统服务供需耦合机制和内部机理，明确生态系统服务流，为区域生态安全和可持续发展提供理论支撑。

5 结 论

本文采用多源数据，以疏勒河流域为例，结合InVEST模型、ArcGIS和GeoDA等空间分析工具，评估了产水、固碳、食物3项生态系统服务供需特征，分析了生态系统服务的供需空间总体特征，并对生态系统服务供需匹配状况进行了探讨，得出如下结论：

（1）产水服务总供给量高值区主要分布于疏勒河流域南部海拔高处；固碳服务总供给量高值区主要分布于疏勒河流域中、下游以及研究区南部植被覆盖较好的区域；食物服务总供给量高值区分布于疏勒河流域绿洲区；产水服务、固碳服务、食物服务总需求量高值区都集中于人口密度较大的敦煌市、瓜州县和玉门市的主城区。

（2）产水服务供需比小于0，供小于求，固碳服务和食物给服务的供需比都大于0，供大于求，整体上固碳服务>食物服务>产水服务，但不同生态系统服务在不同区域存在差异。

（3）疏勒河流域生态系统服务供需匹配存在4种类型：高高型空间匹配、低低型空间匹配、低高型空间错位和高低型空间错位。其中，产水服务以低高型空间错位为主；固碳以低高型空间错位和高低型空间错位为主；食物服务主要以低低型空间匹配为主。

（4）产水服务供给盈余区主要集中于海拔较高的肃北县（南），供给赤字区主要集中于人口密度大、农业较为发达的流域中、下游；固碳服务供给盈余区主要零散分布于肃北县（北）和肃北县（南），供给赤字区主要集中于人口密度较大的主城区；食物服务供给盈余区主要集中于流域中、下游耕地多的地方，供给赤字区分布较少。

参考文献（References）

[1] 巩杰, 柳冬青, 高秉丽, 等. 西部山区流域生态系统服务权衡与协同关系——以甘肃白龙江流域为例[J]. 应用生态学报, 2020, 31(4): 1278−1288. [Gong Jie, Liu Dongqing, Gao Bingli, et al. Tradeoffs and synergies of ecosystem services in western mountainous China: A case study of the Bailongjiang watershed in Gansu, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(4): 1278−1288.]

[2] 赵晓冏, 苏军德, 王建, 等. 甘肃省生态服务供需关系及影响因子研究[J]. 中国环境科学, 2021, 41(10): 4926−4941. [Zhao Xiaojiong, Su Junde, Wang Jian, et al. A study on the relationship between supply-demand relationship of ecosystem services and impact factors in Gansu Province[J]. China Environmental Science, 2021, 41(10): 4926−4941.]

[3] Costanza R, Groot R D, Braat L, et al. Twenty years of ecosystem services: How far have we come and how far do we still need to go?

[J]. Ecosystem Services, 2017, 28: 1-16.

[4] Zhai T L, Wang J, Jin Z F, et al. Did improvements of ecosystem services supply-demand imbalance change environmental spatial injustices?[J]. Ecological Indicators, 2020, 111(C): 106068, doi: 10.1016/j.ecolind.2020.106068.

[5] 翟天林, 王静, 金志丰, 等. 长江经济带生态系统服务供需格局变化与关联性分析[J]. 生态学报, 2019, 39(15): 5414-5424. [Zhai Tianlin, Wang Jing, Jin Zhifeng, et al. Change and correlation analysis of the supply-demand pattern of ecosystem services in the Yangtze River Economic Belt[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(15): 5414-5424.]

[6] 陈骏宇, 王慧敏, 刘钢, 等. "水-能-粮"视角下杭嘉湖区域生态系统服务供需测度及政策研究[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(3): 542-553. [Chen Junyu, Wang Huimin, Liu Gang, et al. Evaluation of ecosystem services and its adaptive policies in the Hangjiahu region under water-energy-food nexus[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2019, 28(3): 542-553.]

[7] Vigl L E, Depellegrin D, Pereira P, et al. Mapping the ecosystem service delivery chain: Capacity, flow, and demand pertaining to aesthetic experiences in mountain landscapes[J]. Science of the Total Environment, 2017, 574: 422-436.

[8] 杨丽雯, 董丽青, 张立伟, 等. 固碳服务供需平衡和服务流量化评估——以引黄入晋南干线为例[J]. 资源科学, 2019, 41(3): 557-571. [Yang Liwen, Dong Liqing, Zhang Liwei, et al. Quantitative assessment of carbon sequestration servic supply and demand and service flows: A case study of the Yellow River diversion project south line[J]. Resources Science, 2019, 41(3): 557-571.]

[9] 刘晶晶, 王静, 戴建旺, 等. 黄河流域县域尺度生态系统服务供给和需求核算及时空变异[J]. 自然资源学报, 2021, 36(1): 148-161. [Liu Jingjing, Wang Jing, Dai Jianwang, et al. The relationship between supply and demand of ecosystem services and its spatio-temporal variation in the Yellow River Basin[J]. Journal of Natural Resources, 2021, 36(1): 148-161.]

[10] 张平, 朱翔, 贺清云, 等. 长江经济带生态系统服务供需时空分异与平衡格局分析[J]. 生态科学, 2020, 39(6): 155-166. [Zhang Ping, Zhu Xiang, He Qingyun, et al. Analysis on the spatial-temporal differentiation and supply-demand balance pattern of ecosystem services in the Yangtze River Economic Zone[J]. Ecological Science, 2020, 39(6): 155-166.]

[11] Talukdar S, Singha P, Shahfahad, et al. Dynamics of ecosystem services (ESs) in response to land use land cover (LU/LC) changes in the lower Gangetic Plain of India[J]. Ecological Indicators, 2020, 112(C): 106121, doi: 10.1016/j.ecolind.2020.106121

[12] Burkhard B, Kroll F, Müller F, et al. Landscapes' capacities to provide ecosystem services: A concept for land-cover based assessments[J]. Landscape Online, 2009, 15: 1-22.

[13] 胡忠秀, 周忠学. 西安市绿地生态系统服务功能测算及其空间格局研究[J]. 干旱区地理, 2013, 36(3): 553-561. [Hu Zhongxiu, Zhou Zhongxue. Ecosystem services evaluation and its spatial pattern analysis of urban green land in Xi'an City[J]. Arid Land Geography, 2013, 36(3): 553-561.]

[14] Costanza R, Ralph A, Groot R D, et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital[J]. Nature, 1997, 387 (6630): 253-260.

[15] Wolff S, Schulp C J E, Kastner T, et al. Quantifying spatial variation in ecosystem services demand: A global mapping approach[J]. Ecological Economics, 2017, 136: 14-29.

[16] Ala-Hulkko T, Kotavaara O, Alahuhta J, et al. Mapping supply and demand of a provisioning ecosystem service across Europe[J]. Ecological Indicators, 2019, 103: 520-529.

[17] Schirpke U, Candiago S, Vigl L E, et al. Integrating supply, flow and demand to enhance the understanding of interactions among multiple ecosystem services[J]. Science of the Total Environment, 2019, 651: 928-941.

[18] 马琳, 刘浩, 彭建, 等. 生态系统服务供给和需求研究进展[J]. 地理学报, 2017, 72(7): 1277-1289. [Ma Lin, Liu Hao, Peng Jian, et al. A review of ecosystem services supply and demand[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72(7): 1277-1289.]

[19] 刘慧敏, 范玉龙, 丁圣彦. 生态系统服务流定量化研究进展[J]. 应用生态学报, 2016, 27(7): 2161-2171. [Liu Huimin, Fan Yulong, Ding Shengyan. Progress of quantitative analysis of ecosystem service flows[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(7): 2161-2171.]

[20] 申嘉澍, 李双成, 梁泽, 等. 生态系统服务供需关系研究进展与趋势展望[J]. 自然资源学报, 2021, 36(8): 1909-1922. [Shen Jiashu, Li Shuangcheng, Liang Ze, et al. Research progress and prospect for the relationships between ecosystem services supplies and demands[J]. Journal of Natural Resources, 2021, 36(8): 1909-1922.]

[21] 刘立程, 刘春芳, 王川, 等. 黄土丘陵区生态系统服务供需匹配研究——以兰州市为例[J]. 地理学报, 2019, 74(9): 1921-1937. [Liu Licheng, Liu Chunfang, Wang Chuan, et al. Supply and demand matching of ecosystem services in loess hilly region: A case study of Lanzhou[J]. Acta Geographica Sinica, 2019, 74(9): 1921-1937.]

[22] Burkhard B, Kroll F, Nedkov S, et al. Mapping ecosystem service supply, demand and budgets[J]. Ecological lndicator, 2012, 21: 17-29.

[23] 赵雪雁, 马平易, 李文青, 等. 黄土高原生态系统服务供需关系的时空变化[J]. 地理学报, 2021, 76(11): 2780-2796. [Zhao Xueyan, Ma Pingyi, Li Wenqing, et al. Spatiotemporal changes of supply and demand relationships of ecosystem services in the Loess Plateau[J]. Acta Geographica Sinica, 2021, 76(11): 2780-2796.]

[24] 胡其玉, 陈松林. 基于生态系统服务供需的厦漳泉地区生态网络空间优化[J]. 自然资源学报, 2021, 36(2): 342-355. [Hu Qiyu, Chen Songlin. Optimizing the ecological networks based on the supply and demand of ecosystem services in Xiamen-Zhangzhou-Quanzhou region[J]. Journal of Natural Resources, 2021, 36(2):

342–355.]

[25] 岳东霞, 李晨, 周妍妍, 等. 疏勒河流域夏季土壤含水量时空变化[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2022, 58(2): 179–185. [Yue Dongxia, Li Chen, Zhou Yanyan, et al. Spatiotemporal changes in soil water content in the Shule River Basin in summer[J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences Edition), 2022, 58(2): 179–185.]

[26] 周妍妍, 朱敏翔, 郭晓娟, 等. 疏勒河流域气候变化和人类活动对植被NPP的相对影响评价[J]. 生态学报, 2019, 39(14): 5127–5137. [Zhou Yanyan, Zhu Minxiang, Guo Xiaojuan, et al. Relative effects of climate change and human activities on net primary productivity in Shule River Basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(14): 5127–5137.]

[27] 孙丽蓉, 周冬梅, 岑国璋, 等. 基于地理探测器模型的疏勒河流域景观生态风险评价及驱动因素分析[J]. 干旱区地理, 2021, 44(5): 1384–1395. [Sun Lirong, Zhou Dongmei, Cen Guozhang, et al. Landscape ecological risk assessment and driving factors of the Shule River Basin based on the geographic detector model[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(5): 1384–1395.]

[28] 周彬, 余新晓, 陈丽华, 等. 基于InVEST模型的北京山区土壤侵蚀模拟[J]. 水土保持研究, 2010, 17(6): 9–13, 19. [Zhou Bin, Yu Xinxiao, Chen Lihua, et al. Soil erosion simulation in mountain areas of Beijing based on InVEST model[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2010, 17(6): 9–13, 19.]

[29] Zhang L, Hickel K, Dawes W R, et al. A rational function approach for estimating mean annual evapotranspiration[J]. Water Resources Research, 2004, 40(2): 89–97.

[30] 张雪峰, 牛建明, 张庆, 等. 内蒙古锡林河流域草地生态系统水源涵养功能空间格局[J]. 干旱区研究, 2016, 33(4): 814–821. [Zhang Xuefeng, Niu Jianming, Zhang Qing, et al. Spatial pattern of water conservation function in grassland ecosystem in the Xilin River Basin, Inner Mongolia[J]. Arid Zone Research, 2016, 33(4): 814–821.]

[31] Cui F O, Tang H P, Zhang Q, et al. Integrating ecosystem services supply and demand into optimized management at different soales: A case study in Hulunbuir, China[J]. Ecosystem Services, 2019, 39: 100984, doi: 10.1016/j.ecoser.2019.100984.

[32] Panek E, Gozdowski D. Analysis of relationship between cereal yield and NDVI for selected regions of central Europe based on MODIS satellite data[J]. Remote Sensing Applications: Society and Environment, 2020, 17: 100286, doi: 10.1016/j.rsase.2019.100286.

[33] Chen D S, Li J, Yang X N, et al. Quantifying water provision service supply, demand and spatial flow for land use optimization: A case study in the Yanhe watershed[J]. Ecosystem Services, 2020, 43: 101117, doi: 10.1016/j.ecoser.2020.101117.

[34] 陶芹, 陶宇, 欧维新. 不同碳减排目标下长三角地区碳固持服务供需演变分析[J]. 长江流域资源与环境, 2022, 31(1): 191–201. [Tao Qin, Tao Yu, Ou Weixin. Mapping the changes in supply and demand of carbon sequestration services in the Yangtze River Delta under different carbon emission reduction targets[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2022, 31(1): 191–201.]

[35] 白杨, 王敏, 李晖, 等. 生态系统服务供给与需求的理论与管理方法[J]. 生态学报, 2017, 37(17): 5846–5852. [Bai Yang, Wang Min, Li Hui, et al. Ecosystem service supply and demand: Theory and management application[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(17): 5846–5852.]

[36] 刘洋, 张军, 周冬梅, 等. 基于InVEST模型的疏勒河流域碳储量时空变化研究[J]. 生态学报, 2021, 41(10): 4052–4065. [Liu Yang, Zhang Jun, Zhou Dongmei, et al. Temporal and spatial variation of carbon storage in the Shule River Basin based on InVEST model[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(10): 4052–4065.]

[37] 魏培洁, 吴明辉, 贾映兰, 等. 基于InVEST模型的疏勒河上游产水量时空变化特征[J]. 生态学报, 2022, 42(15): 6418–6429. [Wei Peijie, Wu Minghui, Jia Yinglan, et al. Spatiotemporal variation of water yield in the upstream regions of the Shule River Basin using the InVEST model[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(15): 6418–6429.]

[38] 石忆邵, 史东辉. 洞庭湖生态经济区生态服务供需平衡研究[J]. 地理研究, 2018, 37(9): 1714–1723. [Shi Yishao, Shi Donghui. Study on the balance of ecological service supply and demand in Dongting Lake ecologica economic zone[J]. Geographical Research, 2018, 37(9): 1714–1723.]

[39] 杨宜男, 李敬, 王立, 等. 长三角地区城市化对典型生态系统服务供需的影响[J]. 自然资源学报, 2022, 37(6): 1555–1571. [Yang Yinan, Li Jing, Wang Li, et al. Impact of urbanization on supply and demand of typical ecosystem services in Yangtze River Delta[J]. Journal of Natural Resources, 2022, 37(6): 1555–1571.]

[40] 相恒星, 张健, 王宗明, 等. 松嫩平原生态系统服务供需研究[J]. 生态环境学报, 2021, 30(8): 1769–1776. [Xiang Hengxing, Zhang Jian, Wang Zongming, et al. Relationships between supply and demand of ecosystem services in the Songnen Plain[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2021, 30(8): 1769–1776.]

Spatial matching characteristics of supply and demand of ecosystem services in the Shule River Basin

ZHOU Fan[1], ZHOU Dongmei[2], JIN Yinli[2], MA Jing[2], YANG Jing[2],
ZHU Xiaoyan[2], ZHANG Jun[2,3,4]

(1. College of Management, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, Gansu, China; 2. College of Resources and Environment, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, Gansu, China; 3. Research Center for Water-Saving Agriculture in Gansu Province, Lanzhou 730070, Gansu, China; 4. State Key Laboratory of Aridland Crop Science, Lanzhou 730070, Gansu, China)

Abstract: Ecosystem services are closely linked to sustainable human development. Studying the supply and demand characteristics of regional ecosystem services and comprehending their spatial matching status are essential prerequisites for achieving the efficient allocation of ecological resources and promoting regional ecological security. The water production, carbon sequestration, and food services of the Shule River Basin in the Gansu Province of China were all examined on the basis of multisource data and with the assistance of the InVEST model as well as the ArcGIS and GeoDA software. The following are the results of this study: (1) There are discrepancies between different regions and ecosystem services; except for water production services, the supply of other ecosystem services in the Shule River Basin is more than the demand. (2) The supply-demand ratio of comprehensive services in the Shule River Basin is 0.063, and the supply-demand ratios of different ecosystem services are carbon sequestration services (0.1854)>food services (0.0078)>water production services (−0.0043). (3) Water production and carbon sequestration service spaces are mainly based on low-high-type and high-low-type spatial dislocation, respectively, whereas food service spaces are primarily based on low-low-type spatial matching, among which the spatial mismatch of water production services is the most severe.

Key words: ecosystem services; relationship between supply and demand; spatial matching; Shule River Basin